

УЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ МЕЖДУ  
ПРОВОДНИКАМИ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ВИТКОВОЙ  
ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
В ПЕРИОД ПРИРАБОТКИ

В. И. ДЕРЕВЯНКО, Ю. П. ПОХОЛКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Надежность и долговечность асинхронных двигателей в сильной степени зависят от условий работы изоляции обмоток, от технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов [1]. Основные факторы, воздействующие на изоляцию обмоток электрических машин в эксплуатации, известны: тепло, коммутационные перенапряжения, влажность, вибрации, механические усилия, возникающие при пусках и реверсах двигателя. Количественная оценка всех этих факторов позволила бы не только с большей точностью прогнозировать надежность двигателей, но и выбирать оптимальные варианты конструкций обмоток при проектировании двигателей для тех или иных условий эксплуатации.

В данной работе предпринята попытка количественно оценить влияние электродинамических усилий, возникающих между круглыми проводниками при включениях и реверсах двигателей на надежность витковой изоляции обмоток.

Решение этой задачи особенно важно для двигателей старших габаритов, у которых пусковой ток и ток короткого замыкания достигает больших значений. Величина электродинамических усилий между проводниками круглого сечения согласно [2] может быть оценена по формуле:

$$F_{1/2} = 1.02 \left( \frac{i_n}{10} \right)^2 \cdot \frac{2}{a} \text{ кГ}, \quad (1)$$

где

- $i_n$  — пусковой ток,  $\text{ка}$ ;
- $l$  — длина взаимодействующих проводников,  $\text{мм}$ ;
- $a$  — расстояние между центрами проводников,  $\text{мм}$ .

Примечания. Сравниваем полученное значение  $F_{1/2}$ , под действием которого происходит смещение проводников относительно друг друга, сцементированных пропитывающим составом, с силой  $F_{сц}$ , где  $F_{сц}$  — сила сцепления пропитанных проводников, зависящая от вида пропитываемого лака. В случае, если  $F_{1/2} < F_{сц}$ , учитывать влияние электродинамических усилий на надежность витковой изоляции обмоток нецелесообразно.

Оценка влияния электродинамических усилий на надежность витковой изоляции обмоток производилась, исходя из следующих допущений:

1. Распределение углов между осями проводников во всыпной обмотке подчиняется показательному закону.
2. Механическое разрушение изоляции проводников под воздействием



вием электродинамических усилий происходит только в местах плотных касаний проводников в наружных слоях секции лобовых частей и носит характер истирания.

3. Электродинамические усилия между проводниками существенны только при протекании пусковых токов и токов короткого замыкания, поэтому число циклов истирания изоляции провода равно числу включений двигателя.

4. Цементирующая способность пропитывающего состава в период приработки не изменяется.

Перечисленные допущения дают возможность количественно оценить вероятность отказа витковой изоляции обмоток, обусловленную действием электродинамических усилий между проводниками.

1. Параметр показательного распределения между осями проводников  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{1}{\gamma_0}, \text{ 1/град}, \quad (2)$$

где

$\gamma_0$  — средний угол между осями проводников.

2. Число проводников в наружном слое секции обмотки

$$S_{\text{нар}} = \frac{\Pi_c}{d_{\text{из max}}}, \quad (3)$$

где

$$d_{\text{из max}} = 1,075 \cdot d_{\text{из}} \cdot \sqrt{\frac{1}{k_{\text{зап}}}};$$

$d_{\text{из}}$  — диаметр провода по изоляции, мм,

$k_{\text{зап}}$  — коэффициент заполнения пазов;

$\Pi_c$  — периметр секции, мм.

3. Число проводников во внутренних слоях секции

$$S_{\text{вн}} = S - S_{\text{нар}}. \quad (4)$$

4. Число элементарных участков пар проводников, подвергающихся воздействию электродинамических усилий [ЭДУ]

$$N = \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{k_{\text{зап}}}}{1,075}}\right) \left(S_{\text{нар}} + 1,5S_{\text{вн}} - 1,5\right) \times \frac{k \cdot z \cdot l_w}{l_{\text{эл}}} \cdot k_y, \quad (5)$$

где

$k$  — число слоев в пазу;

$z$  — число пазов статора;

$l_w$  — средняя длина витка обмотки, мм,

$k_y$  — коэффициент, учитывающий часть проводников, имеющих возможность перемещения относительно друг друга;

$$k_y = \frac{S_{\text{нар}}}{S} \cdot \frac{l_{\text{лоб}}}{l_w};$$

$l_{\text{эл}}$  — длина элементарного участка проводника, мм.

5. Число элементарных участков пар проводников, характеризующихся определенным средним углом ( $\gamma_i$ ) между осями проводников.

$$k_i = N \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \gamma_i} \quad (6)$$

При расчете можно применить следующие значения  $\gamma_i$ : 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12°.



6. Уровень ЭДУ между элементарными участками проводников, расположенными относительно друг друга под углом  $\gamma_i$ .

$$F_i = \left[ 1,02 \left( \frac{i_n \cdot k_a}{10} \right)^2 \frac{2 \cdot l_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} \right] \cos \gamma_i, [\text{кг}] \quad (7)$$

7. Число включений машины за время  $t_{\text{расч}}$ , [час]

$$v = f_{\text{вкл}} \cdot t_{\text{расч}}, \quad (8)$$

где

$f_{\text{вкл}}$  — частота включений, [1/час]

8. Вероятность разрушения изоляции элементарного участка пары проводников под действием силы  $F_i$  за  $v$  включений машины

$$P_i(F_i) = F \left( \frac{v - \bar{v}_i}{\sigma \bar{v}_i} \right), \quad (9)$$

где  $\bar{v}_i$  — среднее число воздействий силы  $F_i$ , вызывающее разрушение изоляции в пределах элементарного участка;

$\sigma \bar{v}_i$  — среднеквадратическое отклонение числа воздействий силы  $F_i$ , вызывающей разрушение;

$\bar{v}_i$  и  $\sigma \bar{v}_i$  — определяются экспериментально.

Испытания проводов с целью определения числа циклов до полного истирания изоляции в зависимости от прикладываемой нагрузки проводились на установке СЕ-68.

По экспериментальным данным была построена зависимость  $\ln v = f(F_i)$ . Данная функция имеет уравнение ломаной линии, состоящей из двух прямых, пересекающихся в точке  $F_{1/2} = 150 \text{ г/мм}$ . Уравнение прямой, в области которой лежат рабочие значения ЭДУ, можно представить в виде табл. 1.

$$\ln v = 12,9 - 3,88 \cdot 10^{-2}. \quad (10)$$

Таблица 1

Число циклов до отказа стекловолоконной изоляции

$F_{1/2}, \text{ г/мм}$	300	250	200	150	100
$v_{\text{ср}}$	220	452	762	1162	7980
$\sigma v$	29,1	94,4	137,2	302,0	882,0
$\ln v_{\text{ср}}$	5,41	6,14	6,66	7,08	9,02

Полученную зависимость  $\ln v = f(F_i)$  можно использовать для оценки действия ЭДУ на изоляцию всыпных обмоток двигателей.

9. Вероятность разрушения группы элементарных участков, испытывающих при включениях двигателя воздействие силы  $F_i$ ,

$$P_{ki}(F_i) = 1 - [1 - P_i(F_i)]^{k_i}. \quad (11)$$

10. Вероятность отказа витковой изоляции обмотки вследствие воздействия ЭДУ между проводниками обмотки

$$P_{\text{обм}}(F_i) = 1 - \prod_{i=1}^i [1 - P_{ki}(F_i)], \quad (12)$$

где

$i$  — число групп элементарных участков, характеризующихся определенным углом между осями проводников.

Согласно пункту 5,  $i=7$ .



11. Надежность витковой изоляции обмотки, обусловленная воздействием ЭДУ между проводниками

$$R_b(F_i) = 1 - P_{обм}(F_i). \quad (13)$$

Согласно данной модели, были рассчитаны электродинамические усилия между проводниками различных машин серии ВАО с волокнистой изоляцией (результаты сведены в табл. 2) и надежность витковой изоляции

Таблица 2

Данные расчета ЭДУ-(*ер/мм*) между проводниками серии ВАО

Габа- рит	Длина	Полюсность				Усред- ненные ЭДУ по длинам	Средние ЭДУ по га- баритам
		2	4	6	8		
6	1		0,465	0,208	0,208	0,311	0,372
	2	0,660	0,704	0,130	0,241	0,433	
7	1	0,912	0,982	0,778	0,544	0,803	0,926
	2	1,850	1,890	0,256	0,213	1,053	
8	1	0,918	0,905	2,310	1,660	1,450	1,405
	2	1,890	1,790	1,000	0,758	1,360	
9	1	3,870	3,96	2,530	1,910	3,065	3,390
	2	6,120	2,240	3,630	2,830	3,705	
Средние ЭДУ по по- люсам		2,219	1,610	1,356	1,046	$\bar{F}_{1/2}=1,56$	

ВАО-72-4, которая оказалась равной 0,404 при 50 000 тыс. включений машины. Общая надежность витковой изоляции с учетом коммутационных перенапряжений и ЭДУ оказалась равной

$$R_b(\gamma, F_i) = 0,635 \cdot 0,404 = 0,256,$$

величина которой примерно соответствует экспериментальной надежности для данной машины и  $\gamma = 50\,000$ , полученной на заводе «Кузбасс-электромотор».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. РТМ по трехфазным асинхронным двигателям мощностью 0,18=100 квт. Расчет надежности всыпных обмоток. Томск, ЦБТИ, 1970.
2. Г. Б. Холявский. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. Госэнергоиздат, 1962.